

文章编号:1671-8879(2011)05-0018-05

沥青混合料降温速率影响因素的灰关联分析

李 波¹, 刘建勋², 马建兵², 窦 晖¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省路桥建设集团有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘 要:依托天(水)定(西)高速公路沥青路面工程,实测了不同时刻沥青混合料的温度,得到了其降温规律曲线和降温速率,对不同层厚、空气温度、风力、太阳辐射条件下的降温特性进行了统计,并在此基础上,利用灰色关联度分析法对影响沥青混合料降温速率的影响因素进行了分析。结果表明:沥青混合料在摊铺后及最初的碾压过程中温度急剧下降,随着时间的推移,温度下降幅度减缓;外部因素对沥青混合料降温速率影响的关联度排序为层厚、风速、空气温度、下卧层温度和云层分布。

关键词:道路工程;沥青混合料;压实温度;变化规律;灰色关联度

中图分类号:U416.2 **文献标志码:**A

Gray-relation analysis of influencing factors on cooling rate of asphalt pavement

LI Bo¹, LIU Jian-xun², MA Jian-bing², DOU Hui¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Gansu Province Road and Bridge Construction Group Co Ltd, Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: Taking the asphalt pavement engineering of Tianshui—Dingxi in Gansu province as an example, the temperature of asphalt mixture at different time was measured, the cooling curve of asphalt mixture was obtained, the cooling characteristics of asphalt mixture were recorded. Based on those, the influencing factors on cooling rate of asphalt pavement was analyzed by the grey relation degree. The results show that the temperatures of asphalt mixture are sharply declined in initial time after paving, with the time increasing, the cooling rate of asphalt mixture decreases. The correlation effect order of the external factors on the cooling rate are pavement thickness, wind speed, air temperature, surface temperature and cloud underlying distribution. 1 tab, 1 fig, 14 refs.

Key words: road engineering; asphalt mixture; compaction temperature; change law; gray-relation degree

0 引 言

良好的沥青路面质量最终要通过碾压来实现^[1]。中国许多新建高速公路的沥青路面通车不久

就出现早期损坏,大部分是因为没有在适宜的碾压温度范围内进行碾压成型造成的^[2-3]。然而,由于受气温、风力、太阳辐射等因素的影响,热拌沥青混合料降温规律极其复杂,实际操作这个碾压温度的范

收稿日期:2010-11-20

基金项目:甘肃省交通科技项目(GLJKY2010)

作者简介:李 波(1981-),男,宁夏中卫人,副教授,工学博士,E-mail:nxlibolibo@163.com。

围很难。只有掌握沥青混合料摊铺碾压温度下降的规律,确定其影响因素的大小,才能保证沥青混凝土在路面压实度和使用性能方面的要求,这对于控制好沥青路面的质量具有重要的意义。文献[4-8]先后从提高压实度的角度,对摊铺后热沥青混合料的冷却规律和有效压实时间进行了研究;文献[9-11]分别研究了沥青面层混合料在摊铺碾压过程中温度的变化情况,探讨了诸如大气温度、太阳辐射、风速等外界环境因素对混合料摊铺碾压时温度的影响关系;文献[12]通过工程实测数据,得出了沥青混合料有效压实时间的回归公式。目前,国内外对沥青混合料降温速率和有效压实时间的影响因素的研究中,使用的方法多是单因素分析,即考虑的是某一个因素对它们的影响,虽然也有学者曾对多因素的影响进行了研究,但并没有有效地利用数学方法,综合研究这些因素对降温速率和有效压实时间的影响。为此,本文通过对甘肃省天定(天水—定西)高速公路沥青面层施工有关实测数据的分析,在探讨沥青混合料降温规律的基础上,利用灰色关联度分析方法,对影响沥青混合料降温速率的因素进行了排序分析,为确定沥青路面有效压实时间和合理安排沥青混合料施工提供理论依据。

1 研究方案

1.1 分析参数的采集

以天定高速公路鸳鸯立交匝道(CK0+000~CK0+248)沥青路面沥青混合料摊铺施工为依托,现场采集不同层厚沥青路面摊铺时的风速、空气温度、下卧层温度及云层分布。该路段表面层结构为 4 cm 的 AC-16 型改性沥青混合料,中面层为 5 cm 的 AC-20 改性沥青混合料,下面层为 6 cm 的 AC-25 沥青混合料(部分路段混合料厚度有变)。

(1)温度测试。空气温度采用普通温度计测得。沥青混合料内部温度采用插入式温度计测定(各点测温在同一地点、同一时间进行,并且测温时间间隔为 3 min;对于路面以下各点温度,按照规定的时间间隔,将接触式温度计探头以 45°角插入至路面内部,记录其显示温度);下卧层温度采用红外线枪式温度计测得。

(2)风速测试。风速采用 SMART SENSOR 分体式智能测风计测得。

(3)云层分布。云层分布按照云层分布率分为雨层云、层云、高积云、卷层云和卷云 5 个等级,分别取值为 100%、75%、50%、25%和 0%。

1.2 研究思路

按照前述测试方法,得到不同层厚、风速、空气温度、下卧层温度及云层分布时沥青混合料各个时刻的温度,绘制其降温曲线,对该曲线进行线性回归,得到其对应的降温速率。以其中某一工况为例,分析沥青混合料施工降温规律,在此基础上,利用灰色关联度方法对影响沥青混合料降温速率的各个因素进行排序分析。

2 沥青混合料施工降温规律

在外部条件一定(层厚 6 cm,空气温度 3.8℃,下卧层温度 3.1℃,云层覆盖率 100%)时,沥青混合料施工中的降温曲线如图 1 所示。图 1 中, x 为时间; y 为温度; R^2 为判定系数。

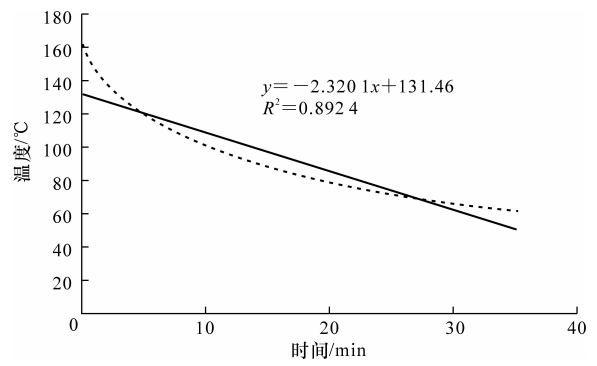


图 1 沥青混合料施工中的降温曲线

从图 1 可以看出,沥青混合料在摊铺后及最初的碾压过程中温度急剧下降,在摊铺后的 5 min 内,一般会下降 25℃左右,产生的对流与热传导作用,致使沥青的一部分热量传递到了环境中,从而降低了其温度。随着时间的推移,温度下降幅度减缓,主要原因是,热拌沥青混合料面层逐渐散失的热量,使得混合料表面附近的空气形成一个较高的温度区域。这一高温区域的形成对抑制热量的过大散失起到了屏蔽作用,热的空气屏蔽区一旦形成,外界环境中的常温区就已经远离混合料,相对较低气温对混合料的影响暂时减弱,从而保护了热拌混合料的热量,使其以较缓慢的速度逐渐损失。

3 沥青混合料降温速率影响因素的灰关联分析

3.1 灰关联分析的计算步骤

灰关联分析是中国著名学者邓聚龙教授 1982 年创立的一门新兴横断学科,它以“部分信息已知、部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统

为研究对象,主要通过对“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行行为的正确认识和有效控制^[13]。灰色系统关联度分析作为一种系统分析技术,是发展态势的量化比较分析,通过计算目标值(参考数列)与影响因素(比较数列)的关联度来评价局势的优劣^[14]。

运用灰关联分析方法主要包括以下步骤。

(1) 选择参考序列和比较序列、收集相关数据。这里将层厚、风速、空气温度、下卧层温度和云层分布率作为比较序列,即 $\{x_1^{(0)}(t)\}$, $\{x_2^{(0)}(t)\}$, $\{x_3^{(0)}(t)\}$, $\{x_4^{(0)}(t)\}$, $\{x_5^{(0)}(t)\}$, 将要进行分析的内容(降温速率)的数据作为参考序列,即 $\{x_0^{(0)}(t)\}$, $t=1,2,\cdots,16$ 。

(2) 量纲一处理。由于收集的数据数量大小差异比较大,为便于处理,首先对各数列进行初值化处理,每个数列均除以该数列第 1 个数,得到新数列并以矩阵形式表示。

(3) 按照

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$$

(1)

计算得到 k 时刻两比较序列的绝对差 $\Delta_{0i}(k)$, 并得到绝对差值矩阵。

(4) 计算关联系数。若记初值化后的参考数列为 X_0 , 记比较数列为

$$\epsilon_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta_{\max}}$$

(2)

式中: Δ_{\max} 为所有比较数列各个时刻绝对差中的最大值; Δ_{\min} 为所有比较数列各个时刻绝对差中的最小值; ρ 为分辨系数, 在 $(0,1)$ 内取值, 一般依据实际, ρ 多在 $0.1 \sim 0.5$ 中取值。

(5) 计算关联度。两比较序列的关联度可以用这个序列各个时刻的关联系数的平均值定量表示, 即有

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \epsilon_{0i}(k)$$

(3)

式中: γ_{0i} 为子序列与母序列 0 的关联度; N 为比较序列的长度(即数据个数, 此处为 16)。

(6) 排序。将子序列对同一母序列的关联度按大小顺序排列起来, 组成关联序列, 关联序列直接反映了各个子序列对同一母序列的“优劣”或“主次”关系。

3.2 沥青混合料降温速率影响因素的灰关联计算

依托天定高速公路沥青路面工程, 对沥青混合料施工过程的层厚、风速、空气温度、下卧层温度、云层分布率等因素进行了统计, 并按照本文方法对各

工况下降温曲线进行一次线性回归得到降温速率, 结果见表 1。

表 1 各外部条件下温拌沥青混合料降温速率

层厚/ mm	风速/ (km · h ⁻¹)	空气温 度/℃	下卧层 温度/℃	云层分布 率/%	降温速率/ (℃ · min ⁻¹)
50	16	16.4	19.4	0	1.588
50	3	15.4	17.8	100	1.838
46	9	16.2	21.1	25	1.825
76	20	19.1	18.6	25	1.436
60	2	3.8	3.1	100	2.320
70	2	9.2	13.1	0	1.838
50	25	3.0	2.0	0	2.108
50	24	23.5	26.7	50	1.412
38	13	19.4	23.5	0	2.091
50	24	23.8	32.4	0	1.545
50	25	20.0	22.1	100	1.756
76	8	15.0	16.0	0	1.663
50	24	16.6	21.3	100	1.359
100	8	32.0	49.4	0	1.328
100	8	34.0	39.4	0	1.302
50	8	25.8	37.0	25	1.521

(1)分析数列的构建。以表 1 中各外部条件以及沥青混合料的降温速率计算结果作为原始数列。其中,以表 1 中的层厚、风速、空气温度、下卧层温度和云层分布率构成比较序列,而降温速率构成参考序列。

(2)影响因素及降温速率量纲一。用均值法将原始数据做量纲一处理。量纲一后的矩阵为

$$\begin{bmatrix} 50 & 16 & 16.4 & 19.4 & 0 & 1.588 \\ 50 & 3 & 15.4 & 17.8 & 100 & 1.838 \\ 46 & 9 & 16.2 & 21.1 & 25 & 1.825 \\ 76 & 20 & 19.1 & 18.6 & 25 & 1.436 \\ 60 & 2 & 3.8 & 3.1 & 0 & 2.129 \\ 70 & 2 & 9.2 & 13.1 & 0 & 1.838 \\ 50 & 25 & 3.0 & 2.0 & 0 & 2.108 \\ 50 & 24 & 23.5 & 26.7 & 50 & 1.412 \\ 38 & 13 & 19.4 & 23.5 & 0 & 2.091 \\ 50 & 24 & 23.8 & 32.4 & 0 & 1.545 \\ 50 & 25 & 20.0 & 22.1 & 100 & 1.756 \\ 76 & 8 & 15.0 & 16.0 & 0 & 1.663 \\ 50 & 24 & 16.6 & 21.3 & 100 & 1.359 \\ 100 & 8 & 32.0 & 49.4 & 0 & 1.328 \\ 100 & 8 & 34.0 & 39.4 & 0 & 1.302 \\ 50 & 8 & 25.8 & 37.0 & 25 & 1.521 \end{bmatrix}$$

(4)

(3) 计算接近度。按照式(1) 计算得到差序列,

得到降温速率与其他因子的绝对差值矩阵为

0.122 0	0.218 8	0.055 2	0.094 8	0.950 2
0.271 5	0.880 5	0.259 3	0.314 9	0.947 9
0.330 4	0.434 7	0.208 2	0.162 0	0.330 4
0.399 3	0.601 7	0.182 8	0.039 5	0.097 6
0.280 4	0.128 0	1.066 8	1.137 5	1.773 5
0.059 8	0.953 5	0.597 6	0.522 1	1.261 2
0.016 6	0.908 6	0.437 6	0.332 4	0.679 0
0.621 8	0.301 4	0.192 5	0.215 1	1.251 2
0.096 4	0.828 8	0.374 2	0.503 9	0.924 6
0.222 6	0.775 7	0.040 6	0.076 4	1.996 8
0.263 8	0.410 5	0.176 4	0.289 5	0.995 0
0.014 9	0.940 2	0.092 6	0.125 9	2.234 4
0.861 5	0.210 3	0.951 4	1.383 2	0.794 8
0.877 4	0.194 5	1.076 4	0.958 2	0.778 9
0.081 9	0.032 5	0.497 9	0.721 3	0.148 1

(5)

从绝对差值矩阵结果可见,外部因素与降温速率关联分析中最小差值 $\Delta_{\min} = 0.014\ 9$,最大差值 $\Delta_{\max} = 2.234\ 4$ 。

(4) 计算关联度。将接近度值及最大差值、最小差值代入式(2),计算外部因素与降温速率之间的关联系数。将计算得到的关联系数代入式(3),得到外部因素与降温速率之间的关联度分别为: $r_1 = 0.528\ 8, r_2 = 0.436\ 2, r_3 = 0.423\ 4, r_4 = 0.313\ 5, r_5 = 0.239\ 8$ 。

3.3 结果分析

由关联度分析结果可以看出,外部因素对热拌沥青混合料降温速率影响的关联度排序为:层厚、风速、空气温度、下卧层温度和云层分布率。

(1)沥青层厚度。沥青面层厚度与混合料降温速率关系最大,主要是因为热拌沥青混合料面层摊铺碾压过程中逐渐散失的热量,使得混合料表面附近的空气形成一个较高的温度区域,这一高温区域的形成对抑制热量的过大散失起到了屏蔽作用;热的空气屏蔽区一旦形成,外界环境中的常温区就已经远离混合料,从而保护了热拌混合料的热量。沥青面层较厚时,这种屏蔽作用更为明显,使得混合料较低气温对混合料的影响暂时减弱,使其以较缓慢的速度逐渐散失。

(2)风速。风速对混合料降温速率的影响也较为明显,原因是,风为空气的自然对流现象,风的影响能够促使空气的流动,加快热量的传递。如果在无风或风力很小的情况下,摊铺层表面附近形成的

高温空气屏蔽区相对稳定和完整,因而热拌混合料向空中传递的热量就较少,混合料温度也将以较低的速率降温。需要注意的是,如果风是不间断地吹,摊铺层上方的空气总保持与大气差不多的温度,摊铺层的表面与上层空气的温差一直比较大,这样混合料通过热传导向空气传递热量就多,因此,风力对温度场的影响很大。而且风的冷却影响可致混合料的表面产生一种硬壳面,其厚度一般为 $1\sim 1.3\text{ cm}$ 不等,这种硬壳面在钢轮压路机的碾压作用下,会造成路面的热龟裂,严重影响沥青路面将来的使用年限。因此,在风速较大的情况下,应抓紧时间碾压,以免影响工程质量。

(3)空气温度。空气温度与混合料降温速率关系居中,分析其主要原因,由于外界周围环境的温度较低时,使得周围空气及下卧层温度均较低,高温的混合料摊铺时,面层顶面和底面与周围环境之间的温度梯度较大,因而通过对流和传导作用传递给面层周围环境和面层的温度就大,其温度下降就快。

(4)下卧层温度。下卧层温度与混合料降温速率关系次之,主要原因在于面层中间与面层顶面和底面也存在温度梯度,随着面层顶面和底面温度的降低,含有较高温度的面层中间向上下两侧传递的热量也较多,因而导致面层中间点温度下降幅度大。

(5)云层分布率。云层分布率与混合料降温速率关系最小,主要原因是,云层分布率会影响到沥青混合料表面的太阳辐射量,而在沥青路面较短的摊铺和压实过程中,太阳辐射量很难快速的聚集,从而对沥青混合料摊铺过程中的温度影响就不如使用过程中那么明显。

4 结 语

(1)沥青混合料在摊铺后及最初的碾压过程中温度急剧下降,在摊铺后的 5 min 内,一般会下降 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

(2)沥青混合料面层逐渐散失的热量,使得混合料表面附近的空气形成一个较高的温度区域,对抑制热量的过大散失起到了屏蔽作用,使得沥青混合料在施工过程中的温度随着时间的推移,温度下降幅度减缓。

(3)灰关联分析法用于分析诸因素对沥青混合料降温速率的影响能获得较好的结果,这说明对于数据离散性很大、相关因素很多的研究对象,灰关联分析法是一种较为理想的数学分析法。

(4)关联度分析结果表明,外部因素对热拌沥青

混合料降温速率影响的关联度排序为:层厚、风速、空气温度、下卧层温度和云层分布率。

参考文献:

References:

- [1] 胡迟春,王端宜,Thyagarajan S. 基于 CT 技术的沥青混合料动态压实均匀性评价[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(6):24-28.
HU Chi-chun,WANG Duan-yi,Thyagarajan S. Homogeneity evaluation of compacted asphalt mixture based on X-ray computed tomography[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6):24-28.
- [2] 张肖宁,尹应梅,邹桂莲. 不同空隙率沥青混合料的粘弹性[J]. 中国公路学报,2010,23(4):1-7.
ZHANG Xiao-ning, YIN Ying-mei, ZOU Gui-lian. Viscoelastic performance of asphalt mixture with different void contents[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(4):1-7.
- [3] 唐 娟,王社良,戴经梁. 沥青混合料离析的评价模型与评价标准[J]. 交通运输工程学报,2010,10(2):1-5.
TANG Xian,WANG She-liang,DAI Jing-liang. Evaluated model and standard of segregation for asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(2):1-5.
- [4] Brown J R. The cooling effects of temperature and wind on rolled asphalt surfacing[R]. Wokingham: TRRL Report SR 624,1980.
- [5] Daines M E. Cooling of bituminous layers and time available for their compaction[R]. Wokingham: TRRL Research Report,1985.
- [6] 尹如军. 沥青混合料有效压实时间的模糊分析与预测[J]. 西安公路交通大学学报,2001,21(4):17-21.
YIN Ru-jun. Fuzzy Analysis and prediction of time available for asphalt mixture compaction[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2001, 21(4):17-21.
- [7] 李长来,叶 红,伍石生. 温度对沥青混合料压实性能的影响[J]. 公路,1999(12):26-27.
LI Chang-lai, YE-hong, WU Shi-sheng. Effect of temperature on the compaction of asphalt mixture[J]. Highway, 1999(12):26-27.
- [8] 裴建中,邢向阳. 温拌沥青混合料施工技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2010,27(3):41-44.
PEI Jian-zhong, XING Xiang-yang. Study on construction technology of warm mix asphalt[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(3):41-44.
- [9] Hensley J. Establishing hot mix asphalt mixing and compaction temperature at the project level[J]. Asphalt, 1998, 12(2):19-23.
- [10] 徐邱彬,高 英. 沥青路面摊铺碾压温度场分析[J]. 中外公路,2008,28(4):49-52.
XU Qiu-bin, GAO Ying. Analysis on the temperature field during asphalt pavement paving[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(4):49-52.
- [11] 李 炜,纪小平. 厂拌热再生沥青混合料生产温度的确定方法[J]. 筑路机械与施工机械化,2010,27(9):57-59.
LI Wei, JI Xiao-ping. Determination of asphalt mixture production temperature of plant mix hot recycling[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(9):57-59.
- [12] 尹如军,李玉亭,张占军. 沥青混合料有效压实时间的实测与分析[J]. 公路,2001(2):37-40.
YIN Ru-jun, LI Yu-ting, ZHANG Zhan-jun. Measure and analysis of time available for asphalt mixture compaction[J]. Highway, 2001(2):37-40.
- [13] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 长沙:华中科技大学出版社,2002.
- [14] 李 波,韩 森,徐鸥明,等. 基于主成分分析法的沥青路面使用性能评价[J]. 长安大学学报:自然科学版,2009,29(3):15-18.
LI Bo, HAN Sen, XU Ou-ming, et al. Evaluation of asphalt pavement performance based on principal component analysis[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3):15-18.